

برآورد ضریب کیفیت Q، با استفاده از فاز ال جی کدا برای نیمه شمالی ایران (کپه داغ، البرز، آذربایجان و بلوک دریای خزر)

فائزه شیرمحمدی^۱، ظاهر حسین شمالی^{۲*} و مهرداد پاکزاد^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۲/۱۱/۲۸، پذیرش نهایی: ۹۳/۱۱/۲۸)

چکیده

هدف از این پژوهش، برآورد ضریب کیفیت با استفاده از فاز ال جی کدا برای نیمه شمالی ایران محصور به عرض جغرافیایی 32° – 40° درجه شمالی و طول جغرافیایی 44° – 62° درجه شرقی است و از نظر تقسیم‌بندی ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی شامل ایالت لرزه‌زمین‌ساختی البرز-آذربایجان، کپه‌داغ، بخشی از ایران مرکزی، بخشی از زاگرس و همچنین بلوک دریای خزر است. ضریب کیفیت در بسامد یک هرتز (Q_0) و وابستگی بسامدی آن (η) با استفاده از ۲۸۲۹ شکل موج حاصل از زمین‌لرزه‌های رخ داده در محدوده مورد بررسی در بازه بسامدی $0/2 - 5/0$ هرتز برآورد شد. بیشترین مقادیر ضریب کیفیت در بازه ۵۰۰–۱۰۰ و بیشترین مقادیر وابستگی بسامدی در بازه ۱–۰ قرار دارد. رابطه $Q = (347 \pm 34) f^{(0.7 \pm 0.1)}$ درحکم رابطه ضریب کیفیت برای کل منطقه مورد بررسی پیشنهاد می‌شود. بررسی نتایج برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی گوناگون در منطقه نشان می‌دهد، در مناطق فعال زمین‌ساختی، به علت به هم ریختگی پوسته، وجود شکستگی‌ها و در نتیجه پراکنش انرژی امواج ال جی کدا، مقادیر ضریب کیفیت کاهش می‌یابد. همچنین مناطق آتشفشانی فعال که از زمان فعالیت آتشفشانی آنها زمان زیادی نمی‌گذرد مقادیر ضریب کیفیت کمی نشان می‌دهند. در نواحی پایدار قاره‌ای و درون صفحه‌ای مقادیر بزرگ‌تری از ضریب کیفیت مورد انتظار است و بیشترین مقادیر ضریب کیفیت مربوط به بلوک دریای خزر است. به‌طور کلی مناطقی که شباهت‌های ساختمانی و زمین‌ساختی مشابهی دارند، مقادیر ضریب کیفیت و وابستگی بسامدی یکسانی نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: ضریب کیفیت، فاز ال جی کدا، وابستگی بسامدی، روش نسبت طیفی برانبارش شده

Estimation of quality factor Q, using Lg coda for the northern part of Iran (Kopeh Dagh, Alborz, Azarbayejan and Caspian Sea block)

Shirmohammadi, F.¹, Shomali, H.² and Pakzad, M.³

¹M.Sc. Student, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics University of Tehran, Iran

²Associate Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³Assistant Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 17 Feb 2014, Accepted: 17 Feb 2015)

Summary

In many seismological applications, the Earth is considered as a perfectly elastic, homogeneous, and isotropic body. Although this assumption is approximately valid, it is known that seismic waves pass through the real Earth that is anelastic, inhomogeneous and anisotropic.

We consider four processes that can reduce wave amplitude, i.e.: geometrical spreading,

scattering, multi-pathing, and anelasticity. The first three are elastic processes, in which the energy in the propagating wave field is conserved. By contrast, anelasticity, sometimes also called intrinsic attenuation, results because the kinetic energy of elastic wave motion is lost to heat by permanent deformation of the medium (Stein and Wysession, 2002). Intrinsic attenuation as one of the factor affecting the attenuation of seismic wave during propagation is discussed in terms of quality factor. Estimation of quality factor is valuable for seismic hazard assessment, ground motion simulation, attenuation relationships, and other seismological studies.

The quality factor is an effective Q , which includes other damping mechanisms. The effective Q is the sum of intrinsic and additional attenuation:

$$\frac{1}{Q_{eff}} = \frac{1}{Q_{int}} + \frac{1}{Q_{add}}$$

Generally, it is impossible to control all effects and the result is an effective Q (Tonn, 1989)

Regional variations in crustal Q are often studied using Lg waves. The most prominent regional phase is the Lg wave that was identified by Press and Ewing (1952). Lg phase is commonly observed in the continental crusts. It is variously described as a superposition of higher mode surface waves or trapped post-critical S waves. Lg phase does not propagate efficiently in the thin oceanic crust. Lg phase has also been observed to have large amplitude in the group velocity windows of 2.8 - 3.5 km/s (Cara et al., 1981).

We applied the stack spectral ratio (SSR) method originally developed by Xie and Nuttli (1988) to obtain Q_0 (Q at 1 Hz) and its frequency dependence (η) of each path integral between different station-event pairs in frequency range of 0.2 - 5.0 Hz for the northern part of Iran (lat. 32 - 40 °N and long. 44 - 62 °E). This part consists of Kopeh Dag, Alborz-Azarbayejan, Some part of Zagros, some part of Central Iran and the Caspian Sea block. The use of the stacking procedure is a major development in obtaining stable Q (f).

The dataset used in this research consist of the vertical component seismograms from 409 events with magnitude (M_N) greater than 4, occurred during the period of 2006- 2013. According to the results obtained in this study, the maximum Q_0 values are in the range of 100 - 500 and maximum frequency dependence values are in the range of 0 - 1. In addition, if it is assumed that $Q = Q_0 f^\eta$, the average values of these two parameters are given by $Q = (347 \pm 34) f^{(0.7 \pm 0.1)}$ for the entire region. According to the tectonic evidences and seismicity pattern, the study region is tectonically active. Therefore, for active regions, attenuation of seismic waves is increased and the values of Q_0 are reduced because of crust heterogeneity, fractures and energy scattering in fractures.

Table 1 shows Q_0 -values obtained for different seismotectonic provinces. Analysis of this table shows that the lowest values of Q_0 characterize the Azarbayejan region and these values are closed to the Alborz region. In addition, Q_0 -values of Zagros and Kopeh Dag regions are similar to each other. Structurally, Kopeh Dag is similar to Zagros. So, similar values of Q_0 and η are expected for these similar tectonic regions. The low Q_0 -values for the Alborz and the Azarbayejan regions compared to the values for Zagros and Kopeh Dag regions may be due to volcanic mountains in this region. It confirms that for the regions with recent volcanic activities, low Q_0 values are expected. For the central Iran in our study region, the moderate to high Q_0 values are obtained. Because this province is an intraplate environment between Zagros and Kopeh Dag, thus it can be suggested that for this kind of region, moderate to high Q_0 values are obtained because of the differences in seismicity patterns. The highest Q_0 is for the Caspian Sea that consists of a thin oceanic crust. For this region the number of surface waves modes is reduced and the Lg phase cannot propagate sufficiently long.

Variation of frequency dependence versus quality factor shows different behavior for different seismotectonic provinces. For the Alborz and the Azarbayejan regions, frequency dependence decreases with increasing Q_0 values. For Zagros and Kopeh Dag, frequency dependence increases with increasing Q_0 values. Overall, we can conclude that similar tectonic regions show similar frequency dependence versus the quality factor.

The quality factor values are plotted versus epicentral distance. It shows a direct relationship between these two parameters and with increasing epicentral distance, the quality factor increases. This trend is not observed in the different seismotectonic provinces. Generally it is expected that with increasing distance from the seismic source, the attenuation of seismic waves is increased. However, several factors such as the regional tectonic conditions, rate of seismicity, sediment thickness and thermal conditions, etc. can affect the value of the quality factor. Since regional tectonic condition has the most important role in determining the quality factor, we cannot solely assess variations of quality factor versus epicentral distance.

Keywords: Quality factor, Lg coda phase, Frequency dependence, Stack spectral ratio method

۱ مقدمه

لرزه‌ای به انرژی گرمایی، سبب کاهش دامنه امواج می‌شود. جذب ذاتی با اصطکاک داخلی یا همان کاهش کیفیت (Q^{-1}) نشان داده می‌شود، عکس این کمیت را ضریب کیفیت (Q) می‌نامند که در واقع بیانگر میزان کشسان بودن زمین است. ضریب کیفیت به دست آمده از روش‌های گوناگون یک Q موثر است، که شامل همه سازوکارهای میراکننده مانند گسترش هندسی، پراکنش و جذب غیر کشسان و مانند آن است. در نتیجه طبق رابطه (۱)، Q موثر (Q_{eff})، شامل Q اضافی (Q_{add}) و ذاتی (Q_{int}) است (تان، ۱۹۸۹).

$$\frac{1}{Q_{eff}} = \frac{1}{Q_{int}} + \frac{1}{Q_{add}} \quad (1)$$

می‌توان اثرهای اضافی را به روش‌های گوناگون جدا کرد اما در حالت کلی کنترل همه عوامل تاثیرگذار، غیر ممکن است. در نتیجه Q به دست آمده یک Q موثر خواهد بود.

امروزه زلزله‌شناسان به دنبال بررسی تغییرات ضریب کیفیت و وابستگی بسامدی آن با جزئیات کامل در زمین هستند و تاکنون روش‌های گوناگونی برای رسیدن به این هدف عرضه شده است. تغییرات منطقه‌ای ضریب کیفیت پوسته معمولاً با استفاده از فاز Lg coda برآورد می‌شود (استین و وایسشن، ۲۰۰۲). این فاز روی لرزه‌نگاشت‌های مسیرهای قاره‌ای در فواصل منطقه‌ای دارای دامنه آغازین بلندی است؛ از این رو در برآورد ضریب کیفیت در فواصل منطقه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. روش مورد استفاده در این پژوهش روش نسبت طیفی برانبارش شده

برآورد کاهش کیفیت امواج با توجه به فاصله یکی از مهم‌ترین بررسی‌های مورد نیاز هر منطقه است. از کاربردهای فراوان آن می‌توان برآورد خطر زمین‌لرزه، شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین، تعیین روابط کاهش کیفیت و دیگر بررسی‌های زلزله‌شناسی اشاره کرد. در بسیاری از مباحث زلزله‌شناسی، زمین درحکم یک جسم کاملاً کشسان، همگن و همسانگرد در نظر گرفته می‌شود. اگرچه این فرض به طور تقریبی جواب قابل قبولی می‌دهد، اما همواره باید این نکته را مدنظر قرار داد که امواج زمین‌لرزه در هنگام عبور از یک محیط واقعی همانند زمین با شرایط غیر کشسان، ناهمگن و ناهمسانگرد روبه‌رو می‌شوند، که بر نحوه انتشار و انرژی آنها موثر خواهد بود. به طور کلی، انرژی امواج حاصل از یک چشمه لرزه‌ای، با افزایش فاصله از چشمه، کاهش می‌یابد و به دنبال آن، دامنه امواج لرزه‌ای نیز با افزایش مسافت پیموده شده کاهش خواهد یافت. عوامل گوناگونی چون تقسیم انرژی در مرز لایه‌ها، چند مسیر شدن، گسترش هندسی، پراکنش و مانند آن بر کاهش یا افزایش دامنه امواج موثر خواهند بود. این عوامل که با نظریه امواج کشسان (Elastic wave theory) توصیف می‌شوند در واقع فرایندهای کشسانی هستند که انرژی را در جبهه موج منتشر شده حفظ می‌کنند و با انتقال دادن انرژی، موجب تغییرات در دامنه امواج می‌شوند. از دیگر عوامل مهم مؤثر بر افت دامنه، جذب ذاتی (تضعیف) است که در اثر شرایط غیر کشسان محیط ایجاد می‌شود و با تبدیل انرژی امواج

(Stack Spectral Ratio Method؛ ژی و ناتلی، ۱۹۸۸) است. این روش پیشرفت مهمی در محاسبه ضریب کیفیت پایدار محسوب می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به حذف اثر دستگاه، چشمه و سایت اشاره کرد. از این‌رو نیازی به تصحیحات این موارد روی لرزه نگاشت‌ها نیست.

۲ معرفی فاز ال‌جی

فاز ال‌جی را اولین بار پرس و اوینگ (۱۹۵۲) در حکم فاز قاره‌ای کوتاه‌دوره معرفی کردند. از آنجا که حرکت این فاز با مقادیر سرعت امواج سطحی در لایه گرانیتی هماهنگ است، آن را ال‌جی نامیده‌اند. گوتنبرگ (۱۹۵۵) این فاز را در حکم امواج برشی به تله افتاده در موهن پوستانه‌ای معرفی کرد. الیور و اوینگ (۱۹۵۷) روشن ساختند که نظریه برهم‌نهی مدهای بالای امواج سطحی، حضور فاز ال‌جی را در لرزه نگاشت‌ها توجیه می‌کند. نوپوف و همکاران (۱۹۷۳) این فاز را در حکم مدهای بالای امواج ریلی معرفی کردند و پانزا و کالکاتیل (۱۹۷۵) این فاز را حاصل از برهم‌نهی مدهای بالای امواج ریلی دانستند. محاسبه لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی با استفاده از نظریه مدهای بالای امواج سطحی نشان می‌دهد که مشخصات فاز ال‌جی از جمله جذب لرزه‌ای با این فرضیه قابل توجیه است (هرمن و کیجکو، ۱۹۸۳). محققان زیادی درباره شناخت ماهیت و شبیه‌سازی فاز ال‌جی تلاش کرده‌اند. در این تحقیقات، فاز ال‌جی به مثابه امواج برشی به تله افتاده در پوسته و همچنین در حکم فاز حاصل از برهم‌نهی مدهای بالای امواج سطحی در نظر گرفته می‌شود.

فاز ال‌جی یک فاز منطقه‌ای است که در فواصل رومرکزی ۱۰۰-۱۵۰۰ کیلومتری، روی لرزه‌نگاشت‌های کوتاه دوره عموماً در مسیرهای قاره‌ای به ثبت می‌رسد. بیشینه دامنه فاز ال‌جی در سرعت گروه میانگین $2/8 - 3/5$ کیلومتر بر ثانیه به ثبت می‌رسد (کارا و همکاران، ۱۹۸۱). البته این مقادیر در نقاط گوناگون زمین و با توجه به مدل زمین‌شناسی منطقه تغییر می‌کند. دامنه این فاز از سایر

فازهای منطقه‌ای همچون P_n و S_n بزرگ‌تر است. برخلاف فازهای کدای محلی همچون کدای S ، در فاز ال‌جی کدای امواج سطحی پراکنش یافته غالب هستند (ژی و ناتلی، ۱۹۸۸). دوره تناوب این فاز $0/5 - 6/0$ ثانیه بیان و در بررسی‌های حوزه بسامد در بازه بسامدی صفر تا ۸ هرتز انتخاب می‌شود.

تغییرات منطقه‌ای ضریب کیفیت پوسته معمولاً با استفاده از فاز ال‌جی برآورد می‌شود. چگونگی نرخ تضعیف دامنه فاز ال‌جی مستقل از نوع چشمه و عمق آن (کمپیلو، ۱۹۹۰) و نوع مولفه ثبت شده (رستگارموند و همکاران، ۱۳۸۲) است. در این پژوهش فاز ال‌جی کدای به‌منظور برآورد ضریب کیفیت منطقه‌ای به کار گرفته شده است.

۳ روش پژوهش

روش مورد استفاده برای برآورد ضریب کیفیت (Q) روش نسبت طیفی برانبارش شده با استفاده از امواج ال‌جی کدای است. در روش نسبت طیفی برانبارش شده ابتدا محل دقیق فازهای P و S تعیین می‌شود و سپس با توجه به سرعت گروه میانگین $2/8 - 3/5$ کیلومتر بر ثانیه، محل فاز ال‌جی کدای روی شکل موج تعیین می‌شود. در این روش از طیف دامنه پنجره ال‌جی کدای استفاده می‌شود که بدین‌منظور پنجره این فاز به پنجره‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود. بازه زمانی برای بررسی فاز پنجره فاز ال‌جی کدای نام دارد. طول این پنجره با توجه به محیط انتشار این فاز، نوع محیط گیرنده و فاصله رومرکزی تغییر می‌کند. شکل ۱ محل شروع فاز ال‌جی کدای و نحوه پنجره‌ای کردن پنجره این فاز را برای مولفه قائم لرزه‌نگاشت زمین‌لرزه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ منطقه اهر- ورزقان، با بزرگی $6/3$ ، ثبت شده در ایستگاه لرزه‌نگاری مرند (MRD) مربوط به شبکه تبریز مرکز لرزه‌نگاری کشوری نشان می‌دهد.

طیف دامنه در یک پنجره ثابت با طول زمان t_i طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود (ژی و ناتلی، ۱۹۸۸).

این نسبت به علت متغیر بودن طیف دامنه برای پنجره‌های گوناگون یکسان نیست. از این رو به منظور بهبود محاسبه ضریب کیفیت می‌توان از راهکارهای زیر استفاده کرد:

۱. استفاده از تابع پنجره مناسب
۲. اطمینان از مناسب بودن اختلاف زمانی دو پنجره متوالی
۳. استفاده از میانگین تعداد زیادی نسبت‌های طیفی متوالی که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$LNRATIO = \frac{RATIO_{ij}}{-\pi(t_j - t_i)} \quad (4)$$

برای این کار، لگاریتم نسبت طیفی پنجره‌های متوالی برحسب بسامد رسم (خطوط مشکی در شکل ۲) و از آنها میانگین حسابی گرفته می‌شود (خط سرخ مشخص شده در شکل ۲).

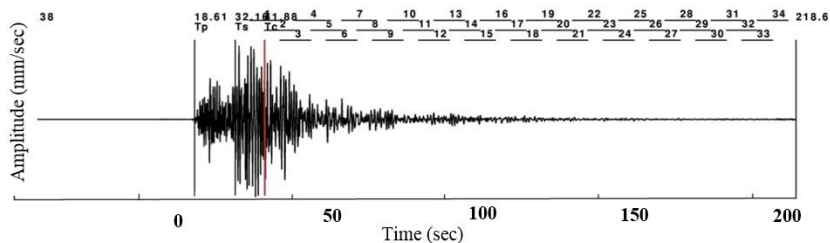
$$S(f, t_i) = A_0 G(r, t_i) e^{-\pi f t_i / Q(f)} \quad (2)$$

در این رابطه $S(f)$ طیف پنجره، f بسامد، A_0 مجموع اثرات چشمه، دستگاه و سایت، G تابع گسترش هندسی، r فاصله رومرکزی، t_i زمان مرکزی یک پنجره ثابت و Q مقدار ضریب کیفیت است.

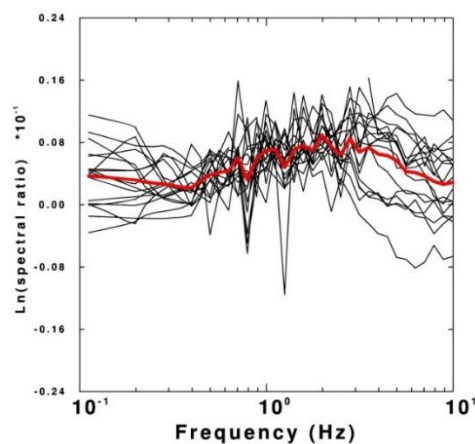
لازم به ذکر است که پنجره ۶۰ ثانیه قبل از شروع فاز P درحکم پنجره نوفه در نظر گرفته شده و از آن برای محاسبه طیف نوفه استفاده شده است. پنجره‌های فاز ال جی کدا که نسبت سیگنال به نوفه آنها کمتر از ۱ بود برای ادامه محاسبات در نظر گرفته نشده‌اند.

نسبت طیف دو پنجره متوالی با زمان مرکزی t_1 و t_2 را می‌توان مطابق رابطه (۳) نشان داد. در این رابطه اثرات چشمه، سایت و دستگاه حذف می‌شود.

$$RATIO_{12} = \frac{S(f, t_2) / G(r, t_2)}{S(f, t_1) / G(r, t_1)} = e^{-\pi f (t_2 - t_1) / Q(f)} \quad (3)$$



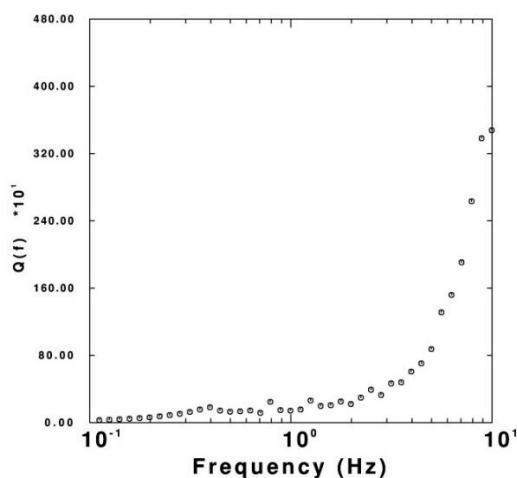
شکل ۱. شکل موج زمین‌لرزه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ (اهر- ورزقان) با بزرگی ۶/۳ ثبت شده در ایستگاه لرزه‌نگاری مرنده با فاصله رومرکزی ۱۰۳ کیلومتر و نحوه پنجره‌ای کردن پنجره ال جی کدا (محل آغاز فاز ال جی کدا با خط سرخ در شکل مشخص شده است).



شکل ۲. نمودار لگاریتم نسبت طیفی برای همه پنجره‌ها برحسب بسامد (خطوط مشکی)، و میانگین آنها (خط سرخ) برای لرزه‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه لرزه‌نگاری مرنده مربوط به زمین‌لرزه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ (اهر- ورزقان) با بزرگی ۶/۳.

شده است. خط سرخ مشخص شده در شکل ۴ رگرسیون خطی اعمال شده برای شکل موج نشان داده شده در شکل ۱ را در بازه بسامدی ۵/۰-۰/۲ هرتز نشان می‌دهد.

با به کار بردن روش نسبت طیفی برانبارش شده، مقدار Q_0 و η برای مسیرهای پرتو بین یک جفت زمین لرزه و ایستگاه به دست می‌آید و در ادامه با استفاده از این مقادیر، می‌توان رابطه ضریب کیفیت و وابستگی بسامدی برای هر منطقه را عرضه کرد.



شکل ۳. مقادیر ضریب کیفیت برحسب بسامد برای شکل موج زمین لرزه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ (اهر- ورزقان) با بزرگی ۶/۳ ثبت شده در ایستگاه لرزه‌نگاری مرند.

با توجه به رابطه (۳)، مقدار رابطه (۴) با $f/Q(f)$ برابر خواهد بود. در نتیجه می‌توان مستقیماً مقدار ضریب کیفیت برای بسامدهای گوناگون را به دست آورد. شکل ۳ مقادیر ضریب کیفیت به دست آمده برحسب بسامدهای گوناگون با توجه به رابطه ذکر شده، برای شکل موج زمین لرزه ۲۱ مرداد سال ۱۳۹۱ منطقه اهر- ورزقان ثبت شده در ایستگاه لرزه‌نگاری مرند را نشان می‌دهد.

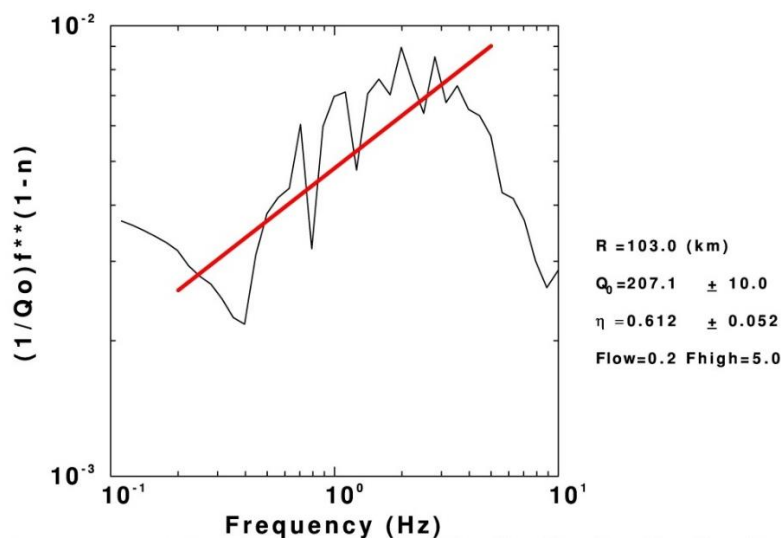
$Q(f)$ را می‌توان به صورت رابطه (۵) نیز بیان کرد. در این رابطه Q_0 ضریب کیفیت در بسامد یک هرتز و η وابستگی بسامدی است.

$$Q = Q_0 f^\eta \quad (5)$$

با گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفین رابطه (۵) و اجرای چند عمل ریاضی، می‌توان رابطه فوق را به صورت زیر نوشت:

$$\ln\left(\frac{Q}{f}\right) = \ln\left(\frac{1}{Q_0} f^{1-\eta}\right) \quad (6)$$

در نتیجه با اعمال یک رگرسیون خطی روی نمودار لگاریتم میانگین نسبت طیفی برحسب بسامد، می‌توان مقدار Q_0 و η را برای هر شکل موج برآورد کرد. شیب خط مقدار η و عرض از مبدا آن مقدار Q_0 را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است برای همه شکل موج‌ها در مرحله اعمال رگرسیون خطی از بازه بسامدی ۵/۰-۰/۲ هرتز استفاده



شکل ۴. نمایش رگرسیون خطی برای به دست آوردن Q_0 و η در روش نسبت طیفی برانبارش شده، برای شکل موج زمین لرزه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ (اهر- ورزقان) با بزرگی ۶/۳ ثبت شده در ایستگاه لرزه‌نگاری مرند.

۴ منطقه مورد بررسی

منطقه مورد بررسی محصور به عرض جغرافیایی ۳۲-۴۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۴-۶۲ درجه شرقی است و از نظر تقسیم‌بندی ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی (میرزایی و همکاران، ۱۹۹۸) شامل ایالت لرزه‌زمین‌ساختی کپه‌داغ، البرز-آذربایجان، بخشی از ایران مرکزی، بخشی از زاگرس و همچنین بلوک دریای خزر است.

ایالت لرزه‌زمین‌ساختی البرز-آذربایجان به منزله بخشی از کمربند لرزه‌ای آلپ-همالیا، بخش‌های شمال و شمال‌غربی ایران را در بر می‌گیرد. حد شمالی آن در امتداد بلوک دریای خزر قرار می‌گیرد. بلوک دریای خزر یک فروافتادگی میان قاره‌ای است که در شمال کمربند کوه‌زایی آلپ-همالیا قرار گرفته است و در حکم منطقه‌ای نسبتاً پایدار در نظر گرفته می‌شود (بربریان، ۱۹۸۳). ایالت لرزه‌زمین‌ساختی کپه‌داغ نیز بخشی از کمربند کوه‌زایی آلپ-همالیا در غرب آسیا است که مرز شمال شرقی فلات ایران را تشکیل می‌دهد و از دیدگاه ساختمانی همانند زاگرس است. نوار چین‌خورده-راندگی زاگرس یکی از جوان‌ترین و جنبا‌ترین پهنه‌های برخورد قاره‌ای در روی زمین است. ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی پهنه‌ای درون‌صفحه‌ای است که از شمال و شمال شرق به منطقه برخوردی البرز-آذربایجان و کپه‌داغ، از غرب و جنوب غرب به منطقه برخورد قاره‌ای زاگرس و از جنوب شرق به منطقه مکران محدود است (میرزایی و همکاران، ۱۹۹۸).

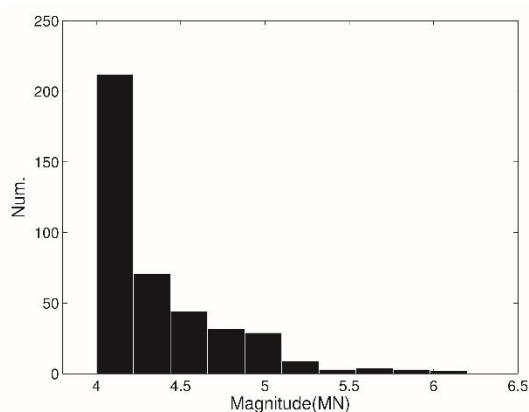
در یک نگاه کلی، منطقه مورد بررسی یکی از لرزه‌خیزترین مناطق جهان محسوب می‌شود و تاکنون زمین‌لرزه‌های مخرب بسیاری را تجربه کرده است. از زمین‌لرزه‌های مخرب دوره جدید می‌توان به دو زمین‌لرزه منطقه اهر-ورزقان واقع در ایالت لرزه زمین‌ساختی البرز-آذربایجان با بزرگی ۶/۵ و ۶/۳ (بنابر اعلام مرکز لرزه‌نگاری کشوری) در تاریخ ۲۱ مرداد سال ۱۳۹۱ اشاره کرد.

۵ پردازش داده‌ها

در این پژوهش، لرزه‌نگاشت‌های ۴۰۹ زمین‌لرزه در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۳، با بزرگی بیشتر از ۴، استخراج شده از مرکز لرزه‌نگاری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران استفاده شده است. بافت‌نما (هیستوگرام) بزرگی زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در شکل ۵ آورده شده است. زمین‌لرزه‌ها در منطقه‌ای محصور به عرض جغرافیایی ۳۲-۴۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۴-۶۲ درجه شرقی قرار داشتند، و همچنین برای افزایش چگالی پرتوهای مورد استفاده و برای پوشش بلوک دریای خزر، از زمین‌لرزه‌های منطقه محصور به عرض جغرافیایی ۴۰-۴۴ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۴-۵۶ درجه شرقی نیز استفاده شده است. در شکل ۶ محل زمین‌لرزه‌ها و ایستگاه‌های لرزه‌نگاری مورد استفاده مشخص است.

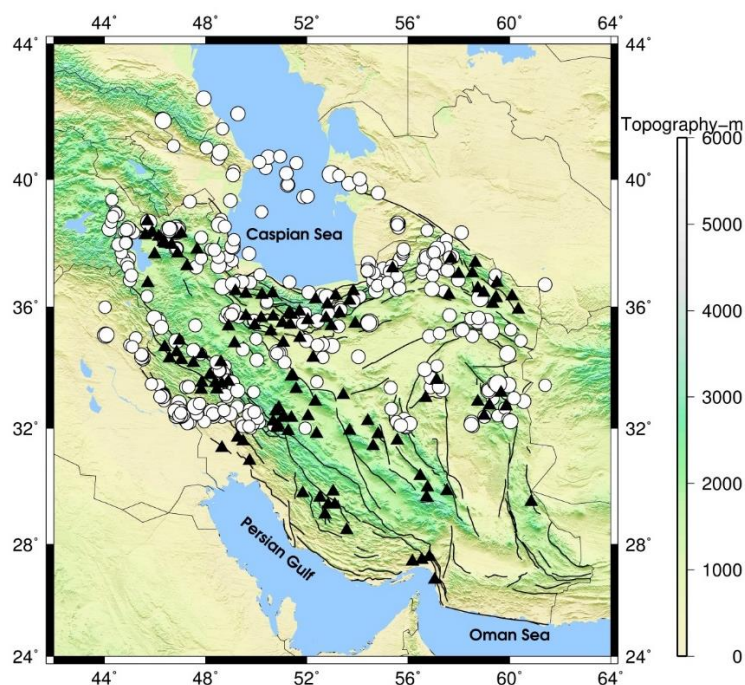
به‌منظور انتخاب داده‌های نهایی، آماده‌سازی داده‌ها برای ورود به برنامه و پردازش آنها، اسکرپت‌های متعددی در محیط لینوکس و نرم‌افزار (Seismic Analysis Code) SAC نوشته شد. از آنجاکه بعد از رخداد زمین‌لرزه‌ها مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌ها صورت می‌گیرد، بعد از دریافت مکان دقیق زمین‌لرزه‌ها از مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران مختصات مکانی همه زمین‌لرزه‌ها و همچنین مختصات جغرافیایی دقیق ایستگاه‌های لرزه‌نگاری تصحیح شده است. بعد از حصول اطمینان نسبت به تصحیح مکان زمین‌لرزه‌ها و ایستگاه‌های لرزه‌نگاری اعمال شرط‌هایی برای انتخاب داده‌های مناسب لازم است. در این پژوهش از مولفه قائم لرزه‌نگاشت‌هایی که در فاصله رومرکزی ۱ تا ۱۵ درجه از محل زمین‌لرزه قرار داشتند استفاده شده است. از میان ۲۹۸۳۳ لرزه‌نگاشت ثبت شده، ۲۸۲۹ لرزه‌نگاشت مولفه قائم که دارای شکل موج مناسبی برای محاسبه ضریب کیفیت و همچنین دارای سطح نوفه کم بودند و با توجه به آستانه ثبت فاز ال جی در فاصله رومرکزی ۱ تا ۱۵ درجه قرار داشتند، به‌منظور قرار گرفتن در پایگاه داده‌های نهایی

پنجره‌های کوچک‌تر (۲۵۶ نمونه‌ای) تقسیم شده است که به مقدار نصف طول هر پنجره کوچک‌تر، این پنجره‌ها با هم همپوشانی دارند. برای تعیین پایان پنجره فاز ال‌جی کدا از نسبت سیگنال به نوفه استفاده شده است و انتهای آن، پنجره‌ای در نظر گرفته شده است که نسبت سیگنال به نوفه برابر یک باشد. به منظور برآورد ضریب کیفیت از برنامه زی و همکاران (۱۹۹۳) و هرمن (۲۰۰۸) استفاده شده است.



شکل ۵. بافت‌نمای بزرگی زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در این پژوهش.

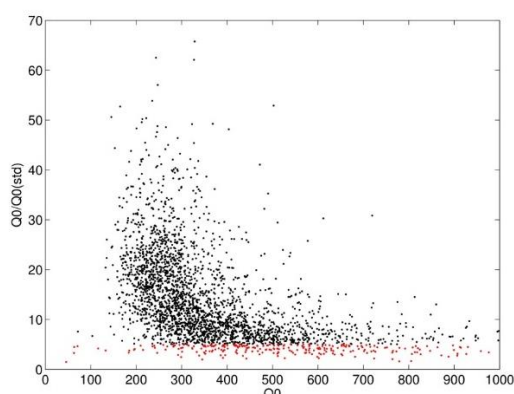
انتخاب شدند. نکته مهم دیگر در خصوص استفاده از داده‌های شکل موج، وارد کردن زمان وقوع زمین‌لرزه‌ها در داده‌ها به فرمت sac است. برای این کار نیاز به نوشتن چندین اسکریپت است. به منظور محاسبه طیف نوفه ۶۰ ثانیه قبل از شروع زمان فاز P در نظر گرفته می‌شود. به منظور تعیین محل فاز P از نرم‌افزار taup و مدل سرعتی iasp91 (کنت و انگدال، ۱۹۹۱) استفاده شده است و سپس تصحیح محل این فاز به صورت دستی صورت گرفته است. برای تعیین محل فاز ال‌جی و ال‌جی کدا روی شکل موج‌ها از سرعت گروه میانگین $2/8 - 3/5$ کیلومتر بر ثانیه استفاده شده است (این سرعت بر پایه بررسی مقاله‌های پژوهشی گوناگون همچون کنت و فرمارا، ۲۰۰۱؛ کمپیلو، ۱۹۹۰ انتخاب شده است). هم‌چنین فیلتر باند پهن $0/2 - 5/0$ هرتز به منظور بهبود شکل موج‌ها به کار رفته است. طول پنجره ال‌جی کدا با توجه به نوع چشمه، عمق چشمه، نوع محیط انتشار، نوع محیط گیرنده و فاصله مرکز سطحی ثبت‌کننده این فاز تغییر می‌کند. طول پنجره فاز ال‌جی کدا به



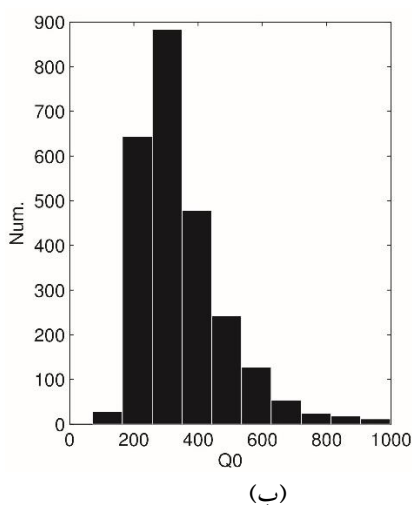
شکل ۶. محل زمین‌لرزه‌ها و ایستگاه‌های لرزه‌نگاری مورد استفاده در این پژوهش، دایره‌های سفید محل زمین‌لرزه‌ها و مثلث‌های سیاه محل ایستگاه‌های لرزه‌نگاری را نشان می‌دهند.

شکل ۹ توزیع مسیرهای پرتو بین زمین‌لرزه و ایستگاه‌های لرزه‌نگاری در منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد، تغییرات رنگ مسیرهای پرتو معرف تغییرات مقادیر ضریب کیفیت است.

با توجه به این نکته که تغییرات ضریب کیفیت به شرایط زمین‌ساختی یک منطقه وابسته است، لازم است بررسی این پارامتر برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی متفاوت به صورت جداگانه صورت گیرد. به منظور جداسازی مسیرهای پرتو در هر ایالت، از مسیرهای پرتویی که زمین‌لرزه و ایستگاه لرزه‌نگاری آنها در یک ایالت لرزه‌زمین‌ساختی قرار داشت استفاده شده است.



شکل ۷. نمودار نسبت ضریب کیفیت به میزان خطای آن برحسب ضریب کیفیت (این نسبت برای داده‌های سرخ‌رنگ کمتر از ۵ و برای داده‌های مشکی‌رنگ بیشتر از ۵ است).

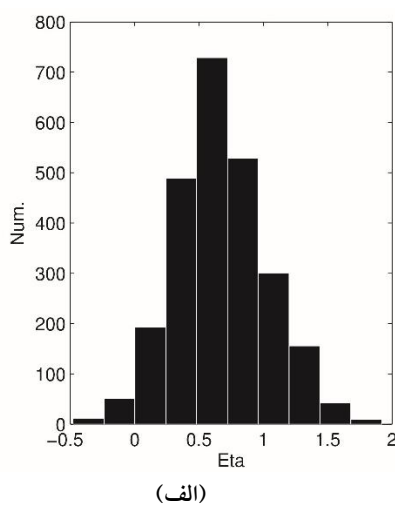


مقادیر ضریب کیفیت در بسامد یک هرتز (Q_0) و وابستگی بسامدی آن (η) برای همه شکل‌های داده‌های نهایی به دست آمد. به منظور افزایش دقت برای ادامه کار، میزان خطای ضریب کیفیت نیز مدنظر قرار گرفت. از این رو نسبت مقدار ضریب کیفیت به میزان خطای آن برای هر شکل موج برآورد شد و داده‌هایی مورد استفاده قرار گرفتند که این نسبت برای آنها بیشتر از ۵ بود. در شکل ۷ داده‌هایی که این نسبت برای آنها کمتر از ۵ بود با رنگ سرخ مشخص شده است. نسبت کم برای این داده‌ها بدین معنی است که میزان خطای بزرگی دارند از این رو تعداد ۳۱۵ داده که در این محدوده قرار داشتند برای ادامه کار حذف شدند و فقط داده‌هایی با میزان خطای کمتر مورد استفاده قرار گرفتند. در شکل ۷ داده‌های مورد استفاده با رنگ مشکی مشخص شده است.

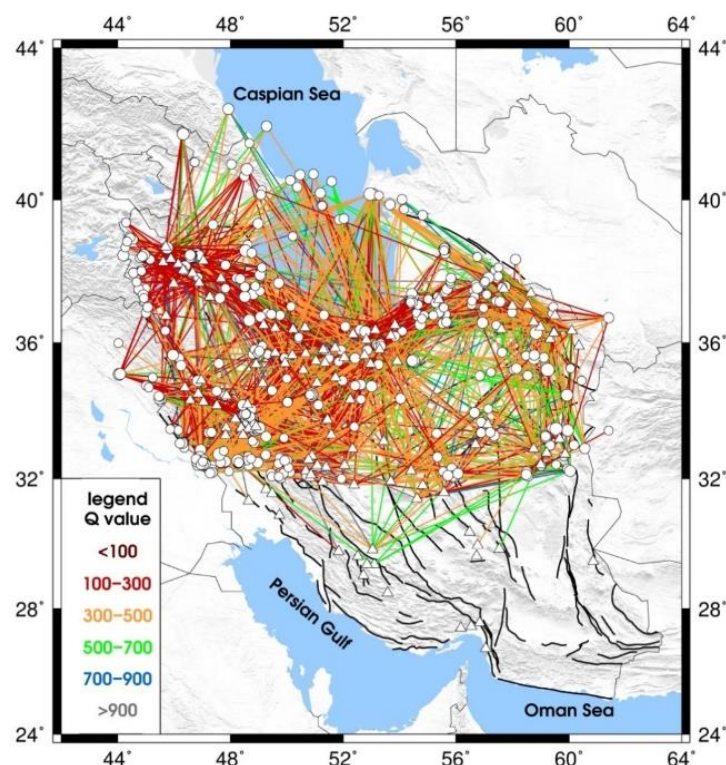
بافت‌نمای مقادیر ضریب کیفیت و وابستگی بسامدی برای این داده‌ها در شکل ۸ مشخص شده است. مقادیر ضریب کیفیت در بازه ۷۵-۱۰۰۰ و مقادیر وابستگی بسامدی در بازه ۰/۵-۲/۰ قرار دارند.

با توجه به رابطه (۵) و مقادیر متوسط ضریب کیفیت و وابستگی بسامدی رابطه (۷) برای کل منطقه مورد بررسی به دست می‌آید:

$$Q = (347 \pm 34) f^{(0.7 \pm 0.1)} \quad (۷)$$



شکل ۸. بافت‌نمای مقادیر (الف) η و (ب) Q_0 .

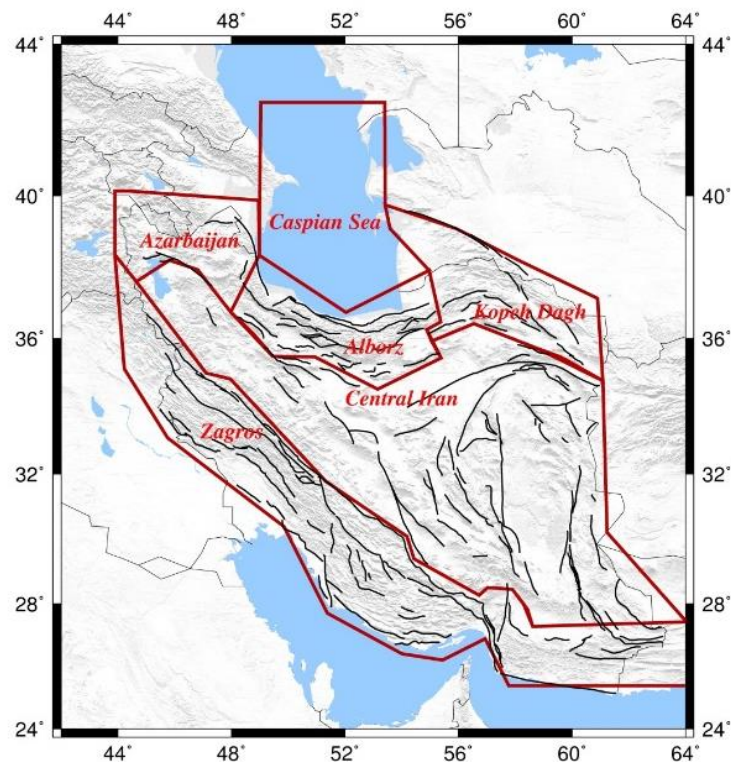


شکل ۹. نقشه مقادیر ضریب کیفیت برای مسیرهای پرتوما بین زمین لرزه و ایستگاه‌های لرزه‌نگاری در منطقه مورد بررسی و موقعیت زمین لرزه‌ها و ایستگاه‌های لرزه‌نگاری، دایره‌های سفید محل زمین لرزه‌ها و مثلث‌های سفید محل ایستگاه‌های لرزه‌نگاری را نشان می‌دهد.

وابستگی بسامدی رابطه جداگانه‌ای برای هر منطقه عرضه کرد. روابط ضریب کیفیت برای ایالت‌های گوناگون در جدول ۲ آورده شده است. میچل و کنگ (۱۹۹۸) با بررسی همه تحقیقات صورت گرفته درخصوص برآورد ضریب کیفیت فاز ال جی کدا با استفاده از روش نسبت طیفی برانبارش شده روشن ساختند که محدوده قابل قبول برای تغییرات ضریب کیفیت در بسامد یک هرتز مقادیر کمتر از ۲۰۰ و تا حدود ۱۰۰۰ است که به شرایط زمین‌ساختی و کوه‌زایی منطقه ارتباط دارد. همچنین کنگ و میچل (۱۹۹۸) مقادیر ۱۵۰۰-۳۰۰ را برای ضریب کیفیت در بسامد یک هرتز برای صفحه ایران و ترکیه گزارش کرده‌اند. نقوی و همکاران (۲۰۱۲) رابطه $Q = (267 \pm 32) f^{(0.7 \pm 0.14)}$ را برای منطقه البرز مرکزی معرفی کرده‌اند. نتایج حاصل از پژوهش حاضر (جدول ۲) با همه بررسی‌های ذکر شده، تطابق قابل قبولی دارد.

برای این کار تقسیم‌بندی ایالات لرزه‌زمین‌ساختی میرزایی و همکاران (۱۹۹۸) با کمی تغییر مد نظر قرار گرفته است. در این تقسیم‌بندی ایران به پنج ایالت لرزه-زمین‌ساختی به نام‌های کپه‌داغ، البرز-آذربایجان، ایران مرکزی، زاگرس و مکران تقسیم شده است. در این پژوهش براساس تقسیم زیرایالت‌ها از سوی طاهرینیا و همکاران (۲۰۱۱) ایالت لرزه‌زمین‌ساختی البرز-آذربایجان به دو زیرایالت البرز و آذربایجان تقسیم شده است. از این رو تقسیم‌بندی مطابق شکل ۱۰ در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج نهایی برای البرز، آذربایجان، کپه-داغ، بخشی از ایران مرکزی، بخشی از زاگرس و بلوک دریای خزر داده شده است. در جدول ۱ متوسط بزرگی زمین‌لرزه‌ها و متوسط فاصله رومرکزی برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی گوناگون آمده است.

با جداسازی مسیرهای پرتو در هر منطقه، می‌توان براساس رابطه (۵) و مقادیر متوسط ضریب کیفیت و



شکل ۱۰. تقسیم‌بندی ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی (میرزایی و همکاران، ۱۹۹۸؛ طاهرینیا و همکاران، ۲۰۱۱).

زمین‌ساختی منطقه وابسته است، برای درک بهتر این موضوع تغییرات موردنظر در ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی گوناگون به تفکیک مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱۲).

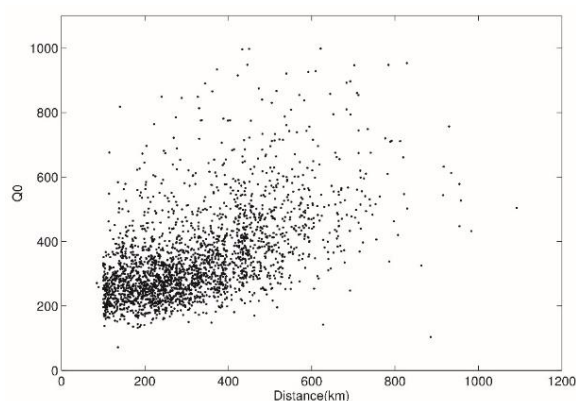
یکی از مباحث مطرح در بررسی ضریب کیفیت، بررسی تغییرات این ضریب با فاصله است. در شکل ۱۱، این تغییرات برای منطقه مورد بررسی نشان داده شده است. با این حال از آنجا که تغییرات ضریب کیفیت به شرایط

جدول ۲. روابط ضریب کیفیت برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی گوناگون در منطقه مورد بررسی.

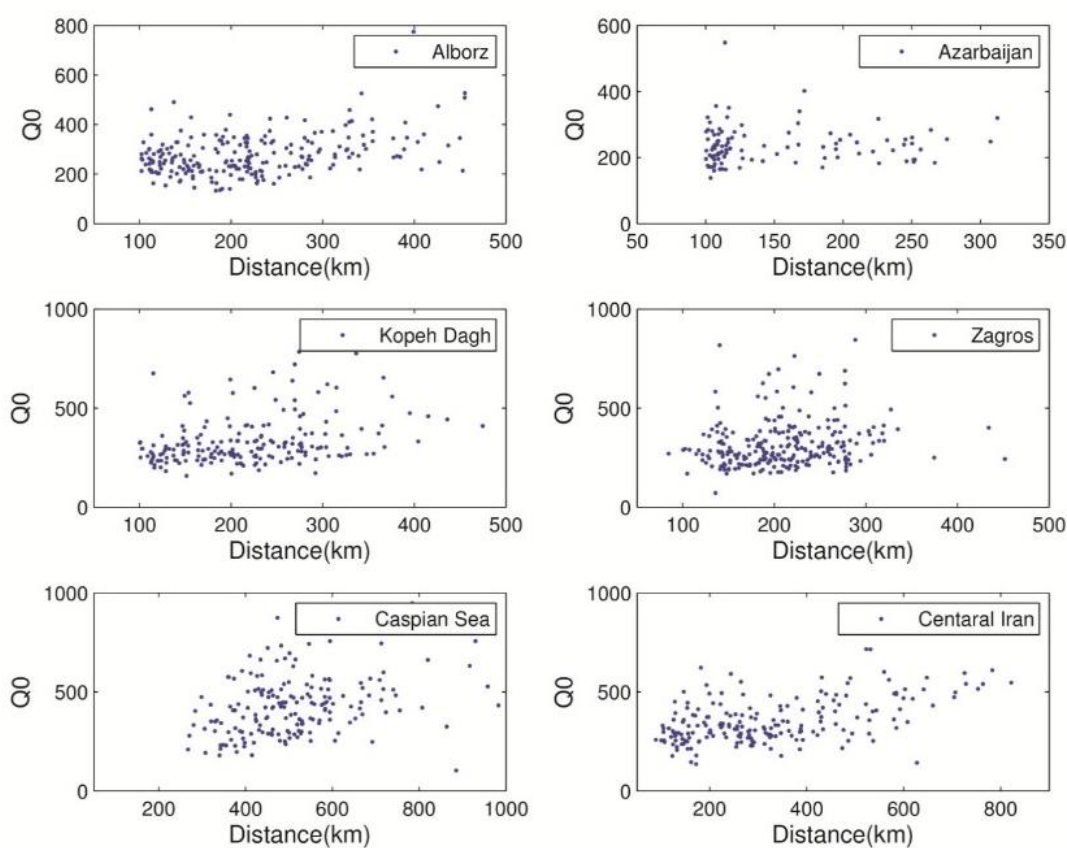
ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی	رابطه ضریب کیفیت و وابستگی بسامدی
البرز	$Q = (281 \pm 23)f^{(0.4 \pm 0.1)}$
آذربایجان	$Q = (237 \pm 21)f^{(0.5 \pm 0.1)}$
بخشی از زاگرس در منطقه مورد بررسی	$Q = (328 \pm 26)f^{(0.8 \pm 0.1)}$
کپه‌داغ	$Q = (340 \pm 24)f^{(0.8 \pm 0.1)}$
بخشی از ایران مرکزی در منطقه مورد بررسی	$Q = (358 \pm 33)f^{(0.5 \pm 0.1)}$
بلوک دریای خزر	$Q = (403 \pm 68)f^{(0.6 \pm 0.2)}$

جدول ۱. متوسط بزرگی زمین‌لرزه‌ها و متوسط فاصله رومرکزی برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی گوناگون.

ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی	متوسط بزرگی زمین‌لرزه‌ها	متوسط فاصله رومرکزی (km)
البرز	4.3	255.49
آذربایجان	4.3	151.50
بخشی از زاگرس در منطقه مورد بررسی	4.4	211.69
کپه‌داغ	4.2	218.98
بخشی از ایران مرکزی در منطقه مورد بررسی	4.4	323.56
بلوک دریای خزر	4.4	511.58



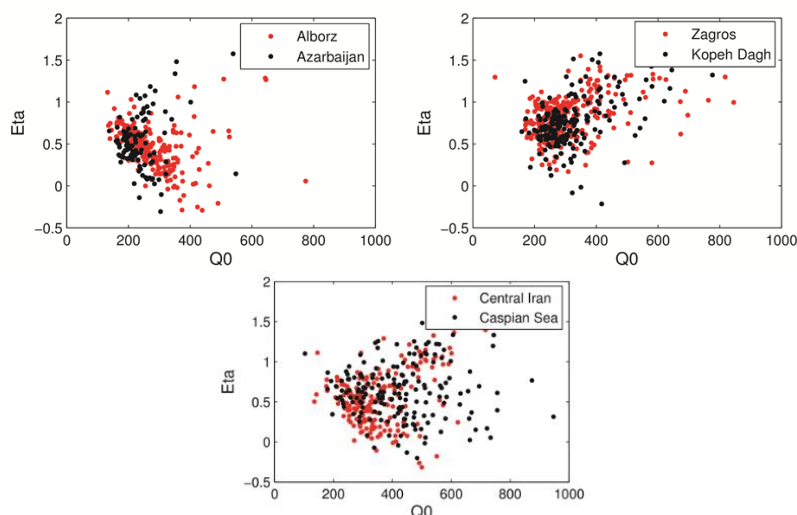
شکل ۱۱. نمودار توزیع فاکتور کیفیت بر حسب فاصله رومرکزی



شکل ۱۲. نمودار ضریب کیفیت بر حسب فاصله رومرکزی برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی گوناگون در منطقه مورد بررسی.

وابسته است، از این رو به منظور دستیابی به تحلیل دقیق‌تر در مورد این موضوع، نمودار وابستگی بسامدی بر حسب ضریب کیفیت برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی گوناگون معرفی شده در شکل ۱۰، رسم شده است (شکل ۱۳).

یکی دیگر از مباحثی که در مورد ضریب کیفیت باید مورد تحقیق قرار گیرد، بررسی تغییرات ضریب کیفیت و وابستگی بسامدی است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، تغییرات ضریب کیفیت به شرایط زمین‌ساختی یک منطقه



شکل ۱۳. نمودار تغییرات وابستگی بسامدی برحسب ضریب کیفیت برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی گوناگون در منطقه مورد بررسی.

۶ نتیجه‌گیری

منطقه مورد بررسی، محصور به عرض جغرافیایی ۳۲-۴۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۴-۶۲ درجه شرقی است و از نظر تقسیم‌بندی ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی شامل ایالت لرزه‌زمین‌ساختی البرز-آذربایجان، کپه‌داغ، بخشی از ایران مرکزی، بخشی از زاگرس و همچنین بلوک دریای خزر است. از آنجاکه ضریب کیفیت و وابستگی بسامدی به شرایط زمین‌ساختی منطقه وابسته است، به‌خوبی می‌توان تغییرات این پارامتر را در این منطقه مورد بررسی قرار داد. در یک بررسی کلی، نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر ضریب کیفیت در بازه ۱۰۰-۵۰۰ و بیشترین مقادیر وابستگی بسامدی در بازه ۱-۱۰ قرار دارد. با توجه به این نکته که منطقه مورد بررسی، طبق شواهد زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی جزء مناطق فعال زمین‌ساختی محسوب می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که در مناطق فعال زمین‌ساختی، به علت به‌هم‌ریختگی پوسته، وجود شکستگی‌ها و در نتیجه پراکنش انرژی امواج ال جی کدا در این شکستگی‌ها، جذب انرژی این امواج افزایش می‌یابد و به دنبال آن مقادیر ضریب کیفیت کاهش پیدا می‌کند. رابطه $Q = (347 \pm 34) f^{(0.7 \pm 0.1)}$ به منزله رابطه ضریب کیفیت و وابستگی بسامدی برای کل منطقه مورد بررسی

پیشنهاد می‌شود. بررسی این رابطه برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی گوناگون (جدول ۲) در منطقه مورد تحقیق نشان می‌دهد که کمترین مقادیر ضریب کیفیت مربوط به منطقه آذربایجان و به رابطه به‌دست آمده برای البرز نزدیک است. همچنین مقادیر به‌دست آمده برای ضریب کیفیت و وابستگی بسامدی برای زاگرس و کپه‌داغ نزدیک به هم است. از مقایسه این روابط و با توجه به شباهت‌های ساختمانی این دو ایالت (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۸) می‌توان نتیجه گرفت در مناطقی که شباهت‌های ساختمانی و زمین‌ساختی وجود دارد، مقادیر ضریب کیفیت و وابستگی بسامدی یکسانی مورد انتظار است. مقادیر ضریب کیفیت برای ایالت لرزه‌زمین‌ساختی البرز و آذربایجان کمتر از مقادیر به‌دست آمده برای ایالت لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس و کپه‌داغ است. توجه به این نکته ضروری است که کاهیدگی امواج زمین‌لرزه یک ضریب با اهمیت در بررسی تغییرات دما در زمین است. اختلاف مقادیر ضریب کیفیت برای مناطق ذکر شده، را می‌توان ناشی از حضور آتشفشان‌های دماوند، سهند و سبلان در منطقه البرز و آذربایجان دانست، و به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که مناطق آتشفشانی فعال که از فعالیت آتشفشانی آنها زمان زیادی نمی‌گذرد مقادیر ضریب کیفیت کوچکی

دارند. بررسی رابطه ضریب کیفیت، مقادیر بزرگتر از این پارامتر را برای ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت مناطقی که در نواحی پایدار قاره‌ای و درون‌صفحه‌ای قرار دارند، مقادیر بزرگ‌تری از ضریب کیفیت مورد انتظار است. بیشترین مقدار ضریب کیفیت مربوط به بلوک دریای خزر است و این امر نشان می‌دهد که در پوسته‌های اقیانوسی احتمالاً به علت تغییر ناگهانی ضخامت پوسته در محل تلاقی پوسته قاره‌ای به اقیانوسی؛ در نتیجه کاهش تعداد مدهای سطحی امواج ریلی و لاو، فاز ال‌جی کدا نمی‌تواند منتشر شود. این امر با نتایج حاصل از شبیه‌سازی فاز ال‌جی (رستگار موحد و همکاران، ۱۳۸۲) هم‌خوانی دارد. روابط داده شده در جدول ۲ در حکم رابطه ضریب کیفیت و وابستگی بسامدی برای مناطق گوناگون گستره مورد تحقیق، پیشنهاد می‌شود.

فاز ال‌جی کدا ناشی از پراکنش فاز ال‌جی است، مقدار ضریب کیفیت به‌دست آمده برای این فاز متأثر از عوامل گوناگونی چون نوع و ضخامت رسوبات، شرایط زمین‌ساختی، نرخ لرزه‌خیزی، پیچیدگی‌ها و به‌هم‌ریختگی پوسته و مانند آن است. در واقع مجموعه‌ای از عوامل تاثیرگذار خواهند بود که بررسی این عوامل به‌صورت جداگانه غیرممکن به نظر می‌رسد. در جدول ۱ اطلاعات موردنظر برای هر ایالت به‌صورت جداگانه ذکر شده است. بررسی این جدول نشان می‌دهد که متوسط بزرگی برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی گوناگون، تقریباً یکسان است اما با توجه به توزیع ناهمگن ایستگاه‌های لرزه‌نگاری در ایالت‌های متفاوت، مقدار فاصله رومرکزی یکسان نیست. باین‌حال با توجه به تاثیر عوامل گوناگون، بررسی مقادیر ضریب کیفیت به‌دست آمده صرفاً براساس این پارامتر میسر نخواهد بود. باین‌حال با رسم مقادیر ضریب کیفیت برحسب فاصله رومرکزی (شکل ۱۱) مشخص می‌شود که رابطه این دو پارامتر مستقیم است و با افزایش فاصله رومرکزی، مقدار ضریب کیفیت افزایش می‌یابد.

در صورتی که به‌طور کلی انتظار می‌رود با افزایش فاصله از چشمه زمین‌لرزه میزان جذب امواج لرزه‌ای افزایش یابد و در نتیجه ضریب کیفیت کاهش یابد. از آنجاکه ضریب کیفیت به شرایط زمین‌ساختی منطقه وابسته است، برای بررسی بهتر تاثیر فاصله رومرکزی بر مقادیر ضریب کیفیت، نمودار مقادیر ضریب کیفیت برحسب فاصله رومرکزی برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی گوناگون در شکل ۱۲ رسم شده است. نتایج این شکل بیانگر این مطلب است که ارتباط واضح و مشخصی بین این دو پارامتر وجود ندارد. فقط یک ارتباط مستقیم در مناطق ایران مرکزی و بلوک دریای خزر مشاهده می‌شود که با توجه به وجود تاثیر عوامل دیگر بر مقادیر ضریب کیفیت در این خصوص نمی‌توان با قطعیت اظهار نظر کرد.

تغییرات وابستگی بسامدی برحسب ضریب کیفیت (شکل ۱۳) برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی تفاوت‌هایی را برای ایالت‌های گوناگون نشان می‌دهد. برای البرز و آذربایجان با افزایش مقدار ضریب کیفیت، مقدار وابستگی بسامدی کاهش می‌یابد. برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی کپه‌داغ و زاگرس با افزایش مقدار ضریب کیفیت، مقدار وابستگی بسامدی نیز افزایش می‌یابد. در مورد ایران مرکزی برای مقادیر ضریب کیفیت کم (زیر ۴۰۰) با افزایش این پارامتر مقدار وابستگی بسامدی هم کاهش می‌یابد و رفتاری مشابه البرز و آذربایجان دارد، اما برای مقادیر بیشتر و همچنین برای بلوک دریای خزر ارتباط مشخصی بین این دو پارامتر وجود ندارد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که مناطق زمین‌ساختی مشابه نحوه تغییرات ضریب کیفیت و وابستگی بسامدی یکسانی را نشان می‌دهند.

تشکر و قدردانی

با سپاس فراوان از مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران که امکان دسترسی به داده‌های موردنیاز این پژوهش را فراهم کرده است.

- Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic provinces, *Journal of Earthquake Prediction Research*, **7**, 465-495.
- Mitchell, B. J. and Cong, L., 1998, Lg coda Q and its relation to the structure and evolution of continents: a global perspective, *Pure and Applied Geophysics*, **153**, 655-663.
- Naghavi, M., Shomali, Z. H. and Zare, M., 2012, Lg Coda variations in north-central Iran, *Int. J. Geophys*, article ID 673506, 7pages
- Oliver, J. and Ewing, M., 1957, Higher modes of continental rayleigh waves, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **47**, 187-204.
- Panza, G. F. and Calcagnile, G., 1975, Lg, and Rg from rayleigh modes, *Geophys. J.*, **40**, 475-487.
- Press, F. and Ewing, M., 1952, Two slow surface waves across North America, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **42**, 219-228.
- Stein, S. and Wysession, M., 2002, *An introduction to seismology, Earthquakes and Earth Structures*, Blackwell Publishing, 512p.
- Tahernia, N., Khodabin, M. and Mirzaei, N., 2011, Mixed model for interoccurrence times of earthquakes based on the expectation-maximization algorithm, *Acta Geophysica*, **59**(5), 872-890
- Tonn, R., 1989, Comparison of seven methods for computation of Q, *Physics of the Earth and planetary interiors*, **55**, 259-268.
- Xie, J., Chen, D. and Herrmann, R. B., 1993, Saclgcoda - obtain Lg Coda Q by a spectral stacking procedure, Saint Louis University and converted to use Sac files, R. B. Herrmann, 2008.
- Xie, J. and Nuttli, O. W., 1988, Interpretation of high-frequency coda at large distances, *Geophys. J.*, **95**, 579-595.
- مراجع
- رستگار موحد، غ. ر.، جواهریان، ع. و میرزایی، م.، ۱۳۸۲، شبیه‌سازی موج Lg حاصل از انفجارات، پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته لرزه‌شناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- Berberian, M., 1983, The southern Caspian: a compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust, *Can. J. Earth Sci.*, **20**, 163-183.
- Campillo, M., 1990, Propagation and attenuation characteristic of the crustal phase Lg, *Pure Appl. Geophys*, **132**, 1-19.
- Cara, M., Minster, J. B. and Lebras, R., 1981, Multimode analysis of rayleigh-type Lg, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **71**, 985-1002.
- Cong, L. and Mitchell, B. J., 1998, Lg Coda Q and its relation to the geology and tectonics of the Middle East, *Pure and Applied Geophysics*, **153**: 563-585.
- Gutenberg, B., 1955, Channel waves in the Earth's crust, *Geophysics*, **20**, 283-294.
- Herrmann, R.B. and Kijko, A., 1983, Modelling some empirical vertical component Lg Relations, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **73**, 157-171.
- Kennett, B. and Engdahl, E. R., 1991, Traveltime for global earthquake location and phase identification, *Geophys. J., Int.*, **105**, 429-465.
- Kennett, B. L. N. and Furumura, T., 2001, Regional phases in continental and oceanic environments, *Geophys. J., Int.*, **146**, 562-568.
- Knopoff, L., Schwab, F. and Kausel, E., 1973, Interpretation of Lg, *Geophys. J.*, **33**, 398-404.
- Mirzaei, N., Mengtan, G. and Yuntai, C., 1998,